



C A P Í T U L O 5

CARBON DOTS: SÍNTSE, CARACTERIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE FILME FLUORESCENTE PARA APLICAÇÃO EM TERMOMETRIA

<https://doi.org/10.22533/at.ed.1232517105>

Livia Elias Da Silva

Instituto de Química e Biotecnologia, Universidade Federal De Alagoas
Maceió, Alagoas, Brasil

Orlando Lucas de Lima Calado

Instituto de Química e Biotecnologia, Universidade Federal De Alagoas
Maceió, Alagoas, Brasil

Islaine Eli Lima Gomes

Instituto de Química e Biotecnologia, Universidade Federal De Alagoas
Maceió, Alagoas, Brasil

Rodrigo da Silva Viana

Instituto de Ciências Farmacêuticas, Universidade Federal De Alagoas
Maceió, Alagoas, Brasil

Cintya D'Angeles do Espírito Santo Barbosa

Instituto de Química e Biotecnologia, Universidade Federal De Alagoas
Maceió, Alagoas, Brasil

RESUMO: Os *Carbon Dots* (CDs) vêm ganhando destaque nos últimos anos por apresentar luminescência no espectro visível, biocompatibilidade, sínteses sustentáveis e podem apresentar sensibilidade frente a variação de temperatura. Nessa perspectiva, o presente trabalho buscou sintetizar *Carbon Dots* para produção de filme fluorescente e avaliar seu potencial como sensor de temperatura. Assim, os CDs foram obtidos por meio do pimentão vermelho via método hidrotermal (CD-PV), e o filme fluorescente foi produzido incorporando o CD-PV em PVA (Poli álcool vinílico) (F/CD-PV). Como resultado, os CDs sintetizados apresentaram tamanho inferior a 10 nm, com distribuição média de $1,55 \pm 0,39$ nm. O FTIR indicou a presença de grupos oxigenados e nitrogenados em sua superfície, característicos do pimentão vermelho. Além disso, apresentou emissão dependente do comprimento de onda de excitação, com intensidade máxima na região do azul, em 448 nm sob excitação de 360 nm. O

filme fluorescente F/CD-PV apresentou boa flexibilidade e transparência, preservou as propriedades luminescentes do CD-PV e exibiu sensibilidade térmica relativa máxima de $0,80\% K^{-1}$ a 343 K. Portanto, os resultados apresentados neste trabalho apontam para perspectivas promissoras no campo da termometria luminescente.

PALAVRAS-CHAVE: Nanopartícula, luminescência, nanotermômetro.

CARBON DOTS: SYNTHESIS, CHARACTERIZATION AND PRODUCTION OF FLUORESCENT FILM FOR APPLICATION IN THERMOMETRY

ABSTRACT: Carbon Dots (CDs) have gained prominence in recent years due to their visible-spectrum luminescence, biocompatibility, sustainable syntheses, and potential sensitivity to temperature variations. In this context, the present work aimed to synthesize Carbon Dots for the production of a fluorescent film and to evaluate their potential as a temperature sensor. The CDs were obtained from red bell pepper using a hydrothermal method (CD-PV), and the fluorescent film was produced by incorporating CD-PV into PVA (polyvinyl alcohol) (F/CD-PV). As a result, the synthesized CDs exhibited sizes below 10 nm, with an average distribution of 1.55 ± 0.39 nm. FTIR analysis indicated the presence of oxygen-containing and nitrogen-containing groups on their surface, characteristic of red bell pepper. Additionally, they showed excitation-wavelength-dependent emission, with maximum intensity in the blue region at 448 nm under 360 nm excitation. The F/CD-PV fluorescent film presented good flexibility and transparency, preserved the luminescent properties of CD-PV, and exhibited a maximum relative thermal sensitivity of $0.80\% K^{-1}$ at 343 K. Therefore, the results presented in this work point to promising prospects in the field of luminescent thermometry.

KEYWORDS: Nanoparticle, luminescence, nanothermometer.

INTRODUÇÃO

Os *Carbon Dots* (CDs) são nanopartículas luminescentes de carbono que foram descobertas em 2004 por Xu e colaboradores (XU, X. et al., 2004). Recentemente, eles vêm sendo classificados em quatro categorias, a depender da sua composição, sendo nomeados como pontos quânticos de grafeno (GQDs) quando apresentam um núcleo com fragmentos de grafeno, pontos quânticos de carbono (CQDs) quando possuem núcleo cristalino esférico, nanopontos de carbono (CNDs) composto por um núcleo amorfó e pontos poliméricos de carbono (CPDs) quando exibem núcleo amorfó com superfície polimérica reticulada (KOUTSOGIANNIS et al., 2020; OZYURT et al., 2023).

Uma das principais vantagens dos CDs é que eles podem ser sintetizados por rotas ambientalmente amigáveis, livres de metais pesados e matérias-primas críticas (REN *et al.*, 2024). Nesse sentido, se apresentam como um material sustentável e, sobretudo, têm apresentado elevado desempenho em aplicações práticas (CHAHAL *et al.*, 2021). Diante disso, diferentes materiais precursores podem ser empregados para a síntese de CDs, dentre os quais se destaca a biomassa, que se trata de materiais orgânicos como plantas, frutos, animais, microrganismos, etc (SUGANTHI AR *et al.*, 2025).

Além disso, os CDs apresentam propriedades únicas como diferentes comprimentos de onda de emissão, baixa citotoxicidade, boa dispersão em água, fotoestabilidade, etc (OZYURT *et al.*, 2023). Com base em suas notáveis propriedades, eles vêm sendo amplamente explorados em diversas áreas de aplicação, como na produção de diodos emissores de luz (LEDs), na conversão de energia em dispositivos fotovoltaicos, em sensoriamento ótico, etc (JI *et al.*, 2023; QURESHI *et al.*, 2024). Dentre essas aplicações, destaca-se seu uso como sensores luminescentes de temperatura (KHAN *et al.*, 2021).

A temperatura é um parâmetro físico que influencia diretamente processos químicos, tecnológicos, biológicos e diagnósticos médicos. Nesse contexto, a busca por sensores térmicos cada vez mais precisos, altamente sensíveis e que atuem em escala nanométrica tem se intensificado nos últimos anos (MOHAMMED e OMER, 2020). Apesar dos CDs já serem amplamente estudados em diferentes aplicações, a literatura ainda apresenta uma lacuna voltada para aplicações termométricas, especialmente em estado sólido (CHEN, Y. *et al.*, 2016; MOHAMMED; OMER, 2020; ZHANG *et al.*, 2020). Nessas condições, geralmente é observado uma extinção da luminescência dos CDs em decorrência da aglomeração das nanopartículas, o que compromete suas propriedades óticas.

No entanto, diferentes pesquisas têm demonstrado que a incorporação dos CDs em polímeros pode ser uma ótima estratégia para reduzir esses efeitos, pois as características luminescentes dos CDs são preservadas (TASPIKA *et al.*, 2019; JIANG *et al.*, 2020). Assim, dentre os polímeros que podem ser usados como matriz, o álcool polivinílico (PVA) vem ganhando destaque devido principalmente a sua excelente hidrofilicidade, transparência e flexibilidade, possibilitando novas perspectivas de aplicação dos CDs em estado sólido (LV *et al.*, 2023; RADHAKRISHNAN *et al.*, 2024; SONG *et al.*, 2024).

Diante disso, este trabalho apresenta uma síntese simples, sustentável e de baixo custo de *Carbon Dots* utilizando como precursor o pimentão vermelho, bem como a produção de um filme fluorescente para atuar como sensor de temperatura.

EXPERIMENTAL

MATERIAIS E REAGENTES

Para realização das sínteses dos *Carbon Dots* e filme fluorescente, foram utilizados pimentão vermelho adquirido em mercado. O glicerol e PVA (álcool polivinílico) 99+% hidrolisado foram obtidos da Sigma-Aldrich e a água ultrapura (18,8 MΩ cm) foi coletada pelo sistema Master System MS2000 (Gehaka, Brasil).

SÍNTESE DOS CARBON DOTS DERIVADOS DO PIMENTÃO VERMELHO (CD-PV)

Os *Carbon Dots* foram obtidos seguindo a metodologia de YIN *et al.*, (2013). Inicialmente, o pimentão vermelho foi cortado em pequenos pedaços. Após, 4 g do pimentão e 1 mL de água deionizada foram adicionados em um reator de aço inoxidável de 25 mL. O material foi transferido para uma estufa, onde permaneceu a 180 °C/ 5h. Após resfriamento, a solução obtida foi centrifugada a 13000 rpm/15 min e o sobrenadante coletado foi disperso em 2 mL de água deionizada. Por fim, o material foi dialisado em membrana de 500 Da por 2h, filtrado em membrana de 0,22 µm e armazenado em geladeira.

SÍNTESE DO FILME FLUORESCENTE (F/CD-PV)

Para produção do filme fluorescente, 150 mg de PVA foram pesados e adicionados em um bêquer de 10 mL. Posteriormente, 5 mL de água deionizada foram adicionados ao polímero e a solução foi agitada durante 5 min a 85 °C, para solubilização completa do material. Após resfriamento, 200 µl do CD-PV (0,8 mg) e 60 µl de glicerol foram acrescentados à solução. O material foi agitado por mais 2 min e a solução obtida foi depositada em placa de petri plástica, permanecendo na estufa a 50 °C/24 h (DA SILVA *et al.*, 2023).

CARACTERIZAÇÕES

Os materiais foram caracterizados por meio de diferentes técnicas para a compreensão de suas propriedades morfológicas, estruturais e fotofísicas. As imagens de microscopia eletrônica de transmissão de alta resolução (HRTEM) foram obtidas por meio do equipamento JEOL JEM-2100. A solução de CD-PV foi diluída, submetida ao banho de ultrassom e gotejadas sobre grids de cobre contendo um ultrafilme de carbono. O difratograma de raio-X foi obtido utilizando o equipamento Shimadzu modelo XRD-6000, com fonte de radiação CuK α ($\lambda = 0,15406$ nm), voltagem de 30 kV, corrente de 30 mA e filtro de Ni. As análises foram realizadas na faixa de 5 a 80

°, com velocidade de goniômetro de 2°/min e passo angular de 0,02°. A medida de Espectroscopia no Infravermelho Por Transformada de Fourrier (FTIR) foi realizada no equipamento *Shimadzu*, modelo IR *Spirit*, utilizando um módulo ATR. Os espectros foram coletados na faixa de 400 a 4000 cm⁻¹, realizando 72 varreduras a cada medida, com resolução de 16 cm⁻¹. O espectro de absorção na região do ultravioleta-visível (UV-Vis) foi obtido por um espectrofotômetro *Shimadzu UV-3600 (UV-VIS-NIR)*. A amostra foi diluída, adicionada em uma cubeta de quartzo com caminho óptico de 1,0 cm e o espectro coletado na faixa de 200 a 700 nm. Os espectros de emissão dos materiais foram obtidos em temperatura ambiente, utilizando o espectrofluorímetro *FluoroLog®-3 (HORIBA, Kyoto, Japão)* equipado com lâmpada de xenônio (CW 450W) e uma fotomultiplicadora detectora (modelo R928P).

Para as medidas de fotoluminescência em função da variação de temperatura foi utilizado um módulo de controle de temperatura acoplado ao espectrofluorímetro citado. A sensibilidade térmica relativa foi calculada utilizando a **Equação 1**.

Equação 1: Fórmula para calcular a sensibilidade térmica relativa de um termômetro luminescente.

$$Sr = \left| \frac{dI}{dT} \times \frac{1}{I} \right| \times 100\% \quad \textbf{Equação 1}$$

Em que Sr é a sensibilidade térmica relativa, dI é a derivada do parâmetro I , dT é a derivada da temperatura e I é a área integrada da intensidade de fluorescência.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os *Carbon Dots* foram obtidos por um método simples, via hidrotermal, a partir do pimentão vermelho. Após purificação, a solução apresentou concentração de 4 mg/mL, sendo produzido aproximadamente 5 mL de CDs por síntese. A **Figura 1** mostra o CD-PV exposto a luz ambiente e luz ultravioleta ($\lambda_{Exc} = 360\text{-}400\text{nm}$), o qual exibe coloração marrom-alaranjada e fluorescência azul esverdeada.

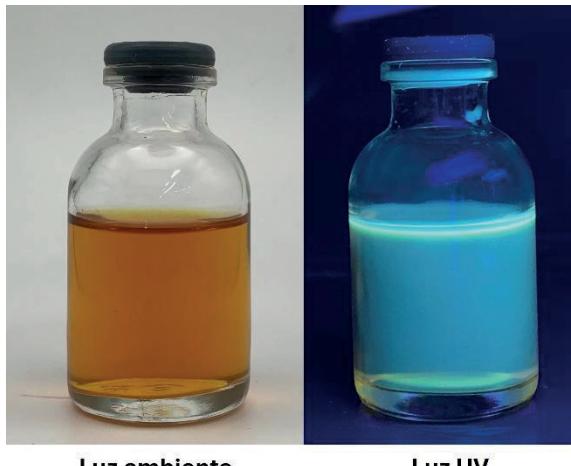


Figura 1: Carbon Dots CD-PV dispersos em solução aquosa sob luz ambiente e luz ultravioleta.

PROPRIEDADES MORFOLÓGICAS E ESTRUTURAIS DOS CARBON DOTS

As imagens de Microscopia Eletrônica de Transmissão de alta resolução (HRTEM) do CD-PV (**Figura 2.a**) revelaram partículas com dispersão homogênea e morfologia quase esférica, apresentando uma estrutura altamente cristalina, com espaçamento de rede de 0,21 nm do plano de difração (100) do carbono grafítico (GUO *et al.*, 2024). Esse resultado confirma a presença de um núcleo grafítico do CD-PV, podendo ser classificado como pontos quânticos de carbono (CQDs) (OZYURT *et al.*, 2023). Além disso, o histograma de distribuição do tamanho das partículas (**Figura 2.b**) indica tamanho médio de $1,55 \pm 0,39$ nm dos CDs sintetizados (ETEFA *et al.*, 2024).

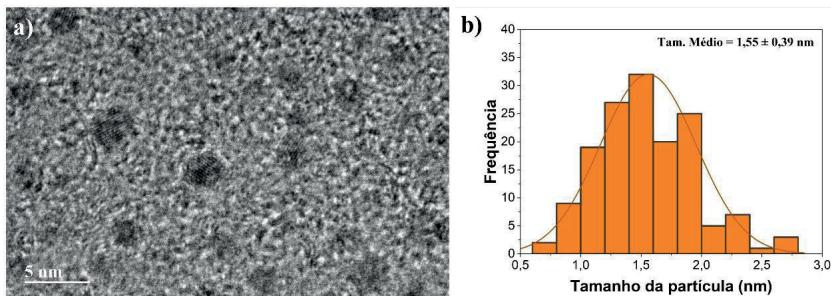


Figura 2: a) Imagem HRTEM e b) Distribuição de tamanho das partículas do CD-PV.

A difração de Raio-X foi utilizada para investigar as características estruturais dos CDs. Observa-se que o CD-PV apresentou um halo de difração entre 10° e 40° , centrado em $24,8^\circ$ (**Figura 3**). Esse resultado indica uma estrutura predominante amorfica dos CDs, associada aos seus grupos de superfície. Todavia, o pico centrado em $24,8^\circ$ se encontra próximo ao plano cristalino (002) da estrutura do grafite, que é característico do núcleo graftítico dos CDs (GUO *et al.*, 2024).

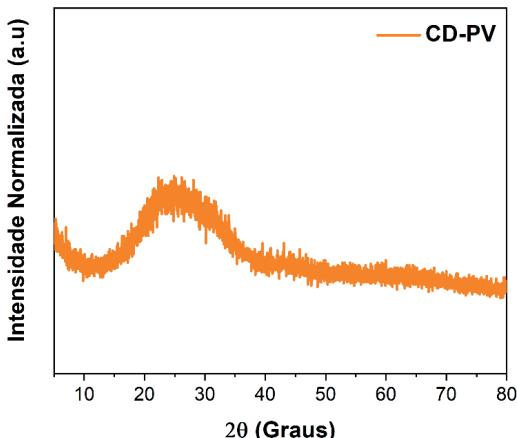


Figura 3: Difratograma de raios-X do CD-PV.

O FTIR foi empregado para analisar a composição química do CD-PV e é apresentado na **Figura 4**. É possível observar no espectro uma banda larga entre 3787 e 3016 cm^{-1} que corresponde às vibrações O-H/N-H. Um pico em 2939 cm^{-1} é identificado referente à ligação C-H e as bandas entre 1658 e 1627 cm^{-1} são associadas às vibrações C=O e C=C. Ainda, os picos entre 1072 e 1033 cm^{-1} estão relacionados às vibrações C-N/ C-O (YIN *et al.*, 2013; GUO *et al.*, 2024). Esses resultados sugerem que a superfície dos CDs é composta por grupos oxigenados e nitrogenados, derivados de moléculas presentes no pimentão vermelho, como substâncias aromáticas, aminoácidos, etc (GUO *et al.*, 2024).

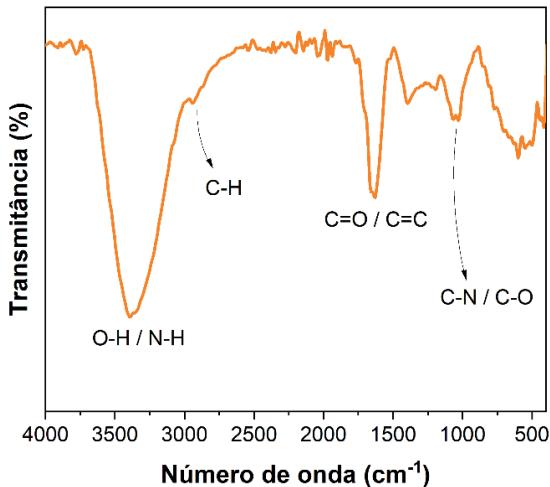


Figura 4: Espectro de FTIR do CD-PV

PROPRIEDADES ÓTICAS DOS CARBON DOTS E FILME FLUORESCENTE

O espectro de absorção no ultravioleta e visível do CD-PV é apresentado na **Figura 5** e revela duas bandas de transições eletrônicas características dos CDs (WANG et al., 2025). A banda de maior energia, situada em aproximadamente 230 nm, é atribuída às transições eletrônicas do tipo $\pi \rightarrow \pi^*$, associadas às ligações C=C presentes na estrutura grafítica dos CDs. A banda centrada em 283 nm corresponde às transições $n \rightarrow \pi^*$, provenientes dos grupos funcionais localizados na superfície do CD-PV, a exemplo das ligações C=O/C-N (OZYURT et al., 2023).

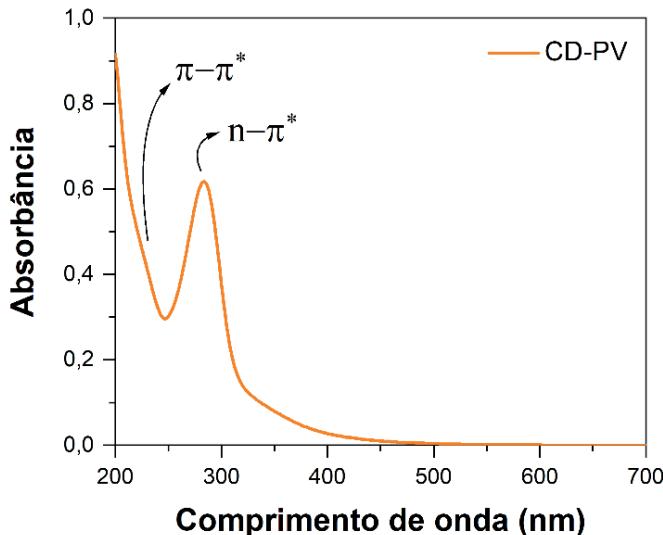


Figura 5: Espectro de absorção UV-Vis do CD-PV.

Para investigar as propriedades luminescentes dos CDs, a espectroscopia de fluorescência foi empregada. Assim, o espectro de fotoluminescência foi obtido variando o λ_{Exc} na faixa de 300-420 nm (**Figura 6**). Inicialmente, é observado que a emissão dos CDs é dependente do λ_{Exc} , visto que ao aumentar o λ_{Exc} , a emissão é deslocada para comprimentos de onda maiores, com intensidade máxima em 448 nm, sob excitação de 360 nm. Na literatura, a maioria dos *Carbon Dots* apresentam emissão dependente do comprimento de onda de excitação, sendo esse comportamento atribuído principalmente aos diferentes grupos funcionais presentes na superfície dos CDs (ZHAO *et al.*, 2022). Como neste trabalho os CDs foram sintetizados a partir do pimentão vermelho, que é rico em compostos orgânicos, a fluorescência do CD-PV pode ser atribuída à presença de grupos oxigenados e nitrogenados em sua superfície, conforme identificado por meio da espectroscopia FTIR.

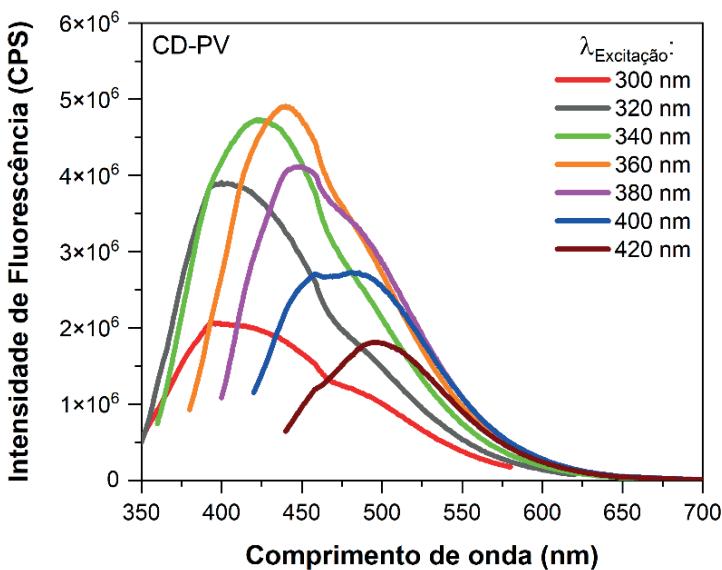


Figura 6: Espectro de fotoluminescência do CD-PV.

A fotoestabilidade do CD-PV foi realizada para verificar se a fluorescência do material seria mantida após um certo período de exposição à luz UV. Assim, a intensidade de fluorescência (IF) dos CDs foi monitorada sob excitação de 360 nm durante 60 min contínuos (**figura 7**). Como observado, a IF do CD-PV é praticamente inalterada durante o tempo analisado, sendo a intensidade inicial (I_0) equivalente a 1 e a final (I_f) a 0,94, indicando que 94% da IF é mantida. Esse resultado comprova que o CD-PV possui excelente fotoestabilidade, apresentando ser um bom material para aplicações que precisem do sinal de fluorescência por longos períodos (ASMAA M. EL-SHAFEY, 2021; JAVED; O'CARROLL, 2021).

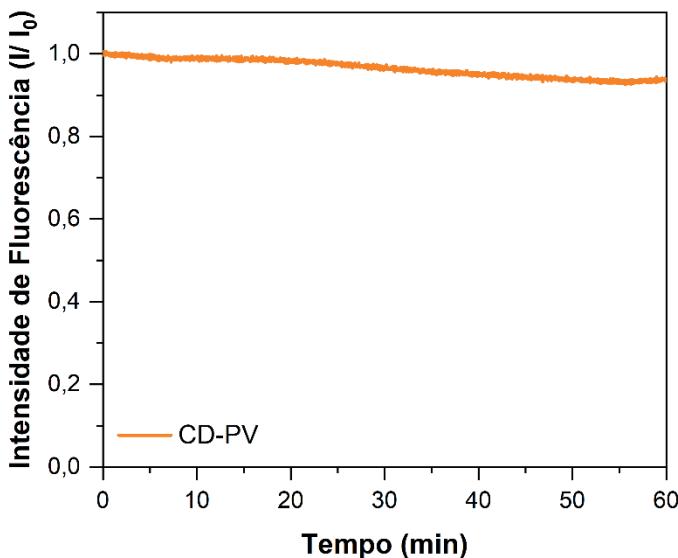


Figura 7: Fotoestabilidade do CD-PV sob radiação UV de 360 nm.

O espectro de fotoluminescência do filme sintetizado (F/CD-PV) é mostrado na **Figura 8** e apresenta emissão dependente do λ_{Exc} , com intensidade máxima em 438 nm ($\lambda_{\text{Exc}} = 360$ nm). Em comparação ao CD-PV (**Figura 6**), o filme apresentou um deslocamento de emissão para um menor comprimento de onda, como já é relatado na literatura. Isso ocorre porque quando a nanopartícula é estabilizada no polímero, ligações de hidrogênio são formadas entre o PVA e os grupos funcionais de superfície dos CDs (BANDI *et al.*, 2018; TASPIKA *et al.*, 2019)the photoluminescence (PL). Assim, devido às diferenças entre os ambientes gerados pelo PVA e pela solução aquosa, as propriedades óticas dos CDs podem apresentar pequenas variações. Apesar disso, a emissão observada no F/CD-PV é similar ao CD-PV, evidenciando que o filme fluorescente obtido neste estudo preservou as propriedades óticas dos *Carbon Dots* (TASPIKA *et al.*, 2019; JIANG *et al.*, 2020).

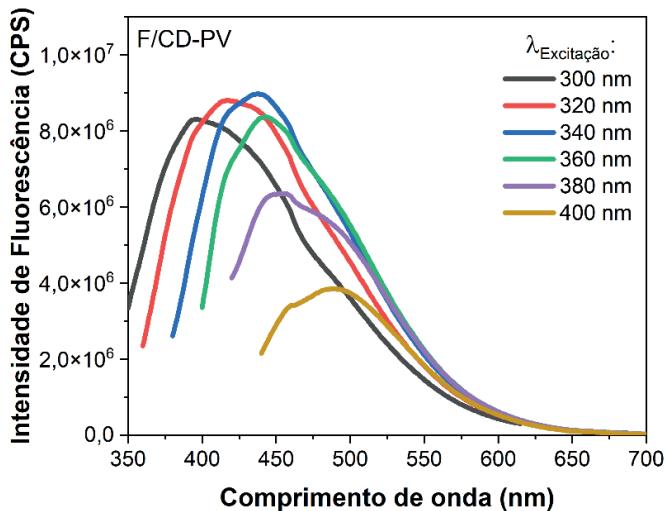


Figura 8: Espectro de fotoluminescência do F/CD-PV.

Ainda, as imagens apresentadas na **Figura 9.a-d** mostram que o F/CD-PV apresenta transparência, excelente flexibilidade e fluorescência azul quando exposto a luz ultravioleta, semelhante ao CD-PV aquoso.

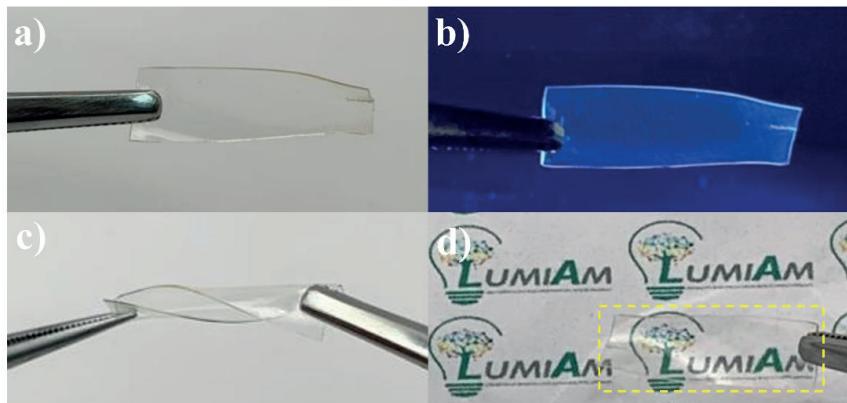


Figura 9: Imagens do F/CD-PV em a) Luz ambiente, b) Luz Ultravioleta, c) Flexibilidade e d) Transparência.

TERMOMETRIA POR LUMINESCÊNCIA DO FILME FLUORESCENTE F/CD-PV

Para investigar o comportamento termométrico do F/CD-PV, os espectros de fluorescência foram obtidos em função da variação de temperatura de 298 a 343 K (**Figura 10.a**). Os resultados demonstram uma redução progressiva na intensidade da luminescência do F/CD-PV com o aumento da temperatura até 343 K, correspondente a uma diminuição de 24% da intensidade de emissão inicial (**Figura 10.b**). Esse comportamento pode ser decorrente da ativação térmica, que leva ao aumento de decaimento não radiativo dos CDs (BANDI *et al.*, 2018; TASPIKA *et al.*, 2019; DA SILVA *et al.*, 2023)the photoluminescence (PL). Diante desse resultado, foi obtida uma relação linear entre a área integrada de fluorescência ($I = 385$ a 680 nm) e a temperatura (298–343 K), com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,994 (**Figura 10.c**). Por meio desses dados, a sensibilidade térmica relativa (Sr) do F/CD-PV foi calculada, usando a **Equação 1**, e apresentou um valor de Sr máxima de $0,80\text{ \% K}^{-1}$ a 343 K (**Figura 10.d**).

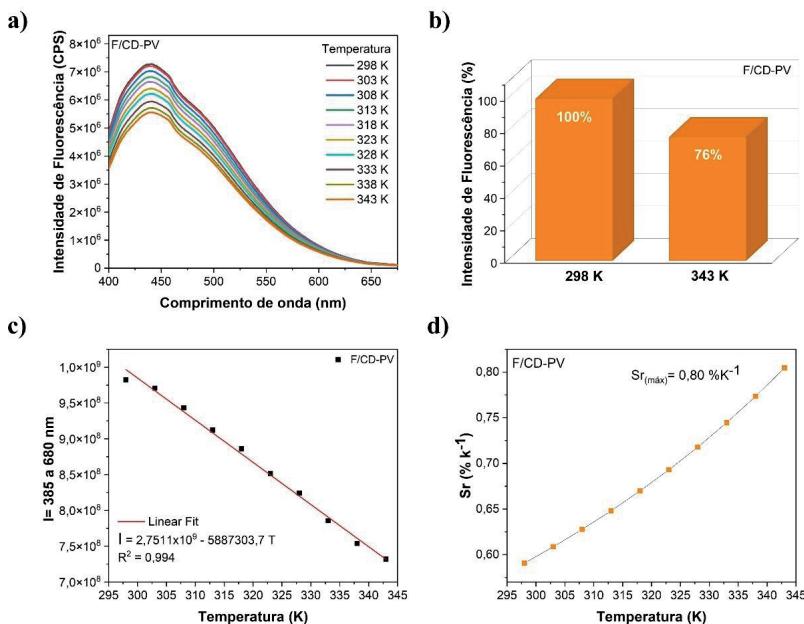


Figura 10: a) Espectro de fluorescência em função da variação de temperatura de 298 a 343 K, sob $\lambda_{\text{exc}} = 360$ nm b) Diminuição da intensidade de fluorescência (%) entre a temperatura inicial e final (298 e 343 K), c) Faixa linear obtida por meio da área integrada do espectro de fluorescência (385-680 nm) e d) Sensibilidade térmica relativa do CD-PV.

Logo, esses resultados demonstram que os CDs sintetizados neste trabalho apresentam aplicação promissora como filme fluorescente e sensor de temperatura. Além disso, a literatura ainda apresenta um número limitado de estudos nessa área, o que reforça a relevância dos resultados obtidos.

CONCLUSÃO

Os *Carbon Dots* foram obtidos com sucesso por meio de uma síntese sustentável utilizando como material precursor o pimentão vermelho. As nanopartículas apresentaram tamanho inferior a 10 nm, alta fluorescência no azul e excelente fotoestabilidade. O filme fluorescente produzido demonstrou ótima flexibilidade, com propriedades luminescentes semelhantes ao CD-PV e sensibilidade térmica relativa máxima de 0,80 % K⁻¹ a 343 K. Assim, os CDs se apresentam como um candidato promissor para futuras aplicações em filmes fluorescentes, bem como na área de termometria.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES, UFAL, CNPq e FAPEAL. Ao Grupo de Óptica e Nanoscopia (GON/IF/UFAL), Grupo de Catálise e Reatividade Química (GCar/IQB/UFAL), Laboratório de Tecnologia de Nanossistemas Carreadores de Substâncias Ativas (TecNano) e Laboratório Multusuário de Microscopia de Alta Resolução do Instituto de Física (LabMic/UFGs) pelo fornecimento da infraestrutura para a realização das caracterizações dos materiais.

REFERÊNCIAS

- ASMAA M. EL-SHAFEY. Carbon dots: Discovery , structure , fl uorescent properties , and applications. **Green Processing and Synthesis**, v. 10, p. 134–156, 2021.
- ATABAEV, T. et al. Sensing and Bio-Sensing Research Nitrogen-doped carbon nanoparticles for potential temperature sensing applications. **Sensing and Bio-Sensing Research**, v. 22, n. October 2018, p. 100253, 2019.
- BANDI, R. et al. Facile Conversion of Toxic Cigarette Butts to N,S-Codoped Carbon Dots and Their Application in Fluorescent Film, Security Ink, Bioimaging, Sensing and Logic Gate Operation. **ACS Omega**, v. 3, n. 10, p. 13454–13466, 2018.
- CHAHAL, S. et al. Green synthesis of carbon dots and their applications. **RSC Advances**, v. 11, n. 41, p. 25354–25363, 2021.

CHEN, Y. et al. A Self-Quenching-Resistant Carbon-Dot Powder with Tunable Solid-State Fluorescence and Construction of Dual-Fluorescence Morphologies for White Light-Emission. **Advanced Materials**, v. 28, n. 2, p. 312–318, 2016.

DA SILVA, L. E. et al. Lemon-derived carbon dots as antioxidant and light emitter in fluorescent films applied to nanothermometry. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 651, p. 678–685, dez. 2023.

ETEFA et al. Carbon Dots for Future Prospects: Synthesis, Characterizations and Recent Applications: A Review (2019–2023). **C**, v. 10, n. 3, p. 60, 2024.

GUO et al. Bell pepper derived nitrogen-doped carbon dots as a pH-modulated fluorescence switching sensor with high sensitivity for visual sensing of 4-nitrophenol. **Food Chemistry**, v. 432, p. 137232, 2024.

JAVED, N.; O'CARRROLL, D. M. Carbon Dots and Stability of Their Optical Properties. **Particle and Particle Systems Characterization**, v. 38, n. 4, p. 1–12, 2021.

JI, C. et al. Light of carbon: Recent advancements of carbon dots for LEDs. **Nano Energy**, v. 114, p. 108623, set. 2023.

JIANG, Yingnan et al. Preparation of dual-emission polyurethane/carbon dots thermoresponsive composite films for colorimetric temperature sensing. **Carbon**, v. 163, p. 26–33, 2020.

KHAN, W. U. et al. Fluorescent Carbon Dots an Effective Nano-Thermometer in Vitro Applications. **ACS Applied Bio Materials**, v. 4, n. 7, p. 5786–5796, 19 jul. 2021.

KOUTSOGIANNIS, P. et al. Advances in fluorescent carbon dots for biomedical applications. **Advances in Physics:X**, v. 5, n. 1, 2020.

LV, G. et al. Facile fabrication of portable electrospun poly(vinyl alcohol)/sulfur quantum dots film sensor for sensitive and selective detection of Fe³⁺. **Optical Materials**, v. 135, p. 113227, jan. 2023.

MOHAMMED, L. J.; OMER, K. M. Carbon Dots as New Generation Materials for Nanothermometer: Review. **Nanoscale Research Letters**, v. 15, n. 1, 2020.

OZYURT et al. Properties, synthesis, and applications of carbon dots: A review. **Carbon Trends**, v. 12, p. 100276, 2023.

QURESHI, Z. A. et al. Carbon dots as versatile nanomaterials in sensing and imaging: Efficiency and beyond. **Heliyon**, v. 10, n. 11, p. e31634, jun. 2024.

RADHAKRISHNAN, K. et al. Sustainable synthesis of fluorescent polymer carbon dots@PVA for sensitive chlortetracycline detection. **Luminescence**, v. 39, n. 8, ago. 2024.

REN, J. et al. Carbon Dots: A Review with Focus on Sustainability. **Advanced Science**, v. 11, n. 35, p. 1–20, 2024.

SONG, Y. et al. Optical and structural properties of chlorophyll a aggregates in PVA film. **Physica Scripta**, v. 99, n. 4, p. 045964, 1 abr. 2024.

SUGANTHI et al. Green Synthesis of Carbon Dots: Advancements, Characterization, and Emerging Biological Applications. **Journal of Fluorescence**, 2025.

TASPIKA, M. et al. Simultaneous ultraviolet and first near-infrared window absorption of luminescent carbon dots/PVA composite film. **RSC Advances**, v. 9, n. 13, p. 7375–7381, 2019.

WANG et al. A review of carbon dots in synthesis, property and application. **Materials Today Communications**, v. 44, n. February, p. 111824, 2025.

XU, X. et al. Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments. **Journal of the American Chemical Society**, v. 126, n. 40, p. 12736–12737, 2004.

YIN et al. Green synthesis of carbon dots with down- and up-conversion fluorescent properties for sensitive detection of hypochlorite with a dual-readout assay. **The Analyst**, v. 138, n. 21, p. 6551, 2013.

ZHANG, Hao et al. Highly luminescent carbon dots as temperature sensors and “off-on” sensing of Hg²⁺ and biothiols. **Dyes and Pigments**, v. 173, 2020.

ZHAO et al. Narrow-bandwidth emissive carbon dots: A rising star in the fluorescent material family. **Carbon Energy**, v. 4, n. 1, p. 88–114, 2022.